

氏名	中尾裕也
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2015号
学位授与の日付	平成11年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	非局所結合素子の時空カオスとその特異性

(主査)

論文調査委員 教授 蔵本由紀 教授 小貫明 教授 吉川研一

論文内容の要旨

熱平衡から遠く隔たった媒質ではしばしば流体乱流に似た時間的・空間的な乱れが自発的に形成されることが知られており、時空カオスと呼ばれる。理想化された非平衡媒質は、低次元散逸力学系を構成要素とする大集団としてモデル化することができるが、時空カオスに関するこれまでの研究はもっぱら要素間結合が局所結合の場合に限られていた。本論文は、非局所的結合をもつ場がこれまで知られていなかったまったく新しいタイプの時空カオス状態を広範な条件の下で示すことを初めて明らかにし、その性質を詳しく解明したものである。

申請者はまずリミットサイクル振動子の1次元鎖のモデルとして指数関数的非局所結合をもつ複素ギンツブルク・ランダウ方程式の数値シミュレーションを行い、適当な条件の下に2点間の振幅差の種々のモーメントが距離 r のべき r^α によってあたえられること、指数 α はモーメントの次数と系のパラメタに連続的に依存することを見出した。これは発達したナビエ・ストークス乱流と同様に、場がいわゆる多重アフィン性をもち、パターンがフラクタル化していることを示している。同様の性質は、より一般的なリミットサイクル振動子系やカオス素子系においても見出された。さらに、これらの系においては振幅の空間微分の絶対値で定義される微分場(微分が存在しないから正確には差分場)が流体乱流のエネルギー散逸場と同様に多重フラクタル性をもつ空間間欠的な場であることが見出された。

場の多重アフィン性は、振幅差についての運動方程式の近似的解析から説明された。すなわち、このような方程式は付加的ノイズを持つ乗法確率過程を表し、したがってその定常確率分布のテイルが逆べき則をもつことから多重アフィン性が導かれる。さらに、数値シミュレーションから明らかになっている事実として、フラクタル化したパターンが結合強度のある臨界値以下でその連続性を失うことが知られているが、このような転移現象も上述の理論から自然に導かれる。これに対して、微分場の多重フラクタル性についてはいくつかの現象論的試みにもかかわらずその理論的説明は未解決のまま残されている。

申請者はまた、このような特異的時空カオスの出現にとって素子間結合の非局所性は必須ではないことを明らかにした。すなわち、反応拡散系のような典型的局所結合系と見なされているような系においても、十分すみやかに拡散する物質を数学的に消去することによって実効的に非局所結合系が得られることに着目し、具体的な3変数反応拡散モデルに対して同様の特異的時空カオスが存在することを数値解析によって示した。

非局所結合系においては、素子の個別運動と内部場の運動とは自己無撞着的に関連している。しかし、上述の理論解析はこのような時空カオスにとって両者の自己無撞着性は重要でないことを示している。したがって、結合を持たない素子系をなめらかな空間変化をもつ適当なランダム外力によって駆動しても類似の現象が期待される。申請者はこのことに着目し、数値シミュレーションによってこれを確認した。

論文審査の結果の要旨

空間的に広がった非平衡開放系においては流体乱流に似た自発的な時間的・空間的乱れが生じる。時空カオスと呼ばれるこのような現象の研究は非線形物理学における中心的な問題の一つとして近年活発に研究されてきた。これまではもっぱら場を構成する要素が局所的な相互作用をもつ場合について研究され、位相乱流、欠陥乱流などの概念の導入によってこのような時空カオスの発生機構とその性質の解明が大いに進んだ。しかしながら、現実の非平衡系には、たとえば神経ネットワークのように非局所的な相互作用をもつ重要な例が存在する。また振動的・興奮的な活動性を持つ細胞群においても、それらの相互作用が速やかな拡散を持つ化学物質によって媒介されている場合には、細胞間結合は実効的に非局所となる。こうした事実にもかかわらず、非局所結合系のダイナミクス、なかんずく時空カオスの研究はこれまでまったくなござりにされてきた。

本論文は、非局所結合をもつ素子集団の時空カオスに関する初めての本格的な研究であり、まったく予想されていなかった特異的空間構造をもつ時空カオスが広範な条件の下にこのような系に存在しうることが見出された。このことから、本研究が非線形科学の各方面にあたるインパクトの大きさは計りしれないものがある。見出された時空カオスは結合距離の内部において自己相似性、多重フラクタル性、空間間欠性などによって特徴づけられ、したがって発達したナビエ・ストークス乱流と多くの類似性をもつ。一方、パターンの連続・非連続転移の存在は本現象に特徴的なものである。

申請者は、計算機シミュレーションと理論解析の両面からこのような特異の時空カオスのロバスト性を説得的に示し、その原因と統計的諸性質を解明することに成功している。具体的には、種々の結合振動子系や興奮素子系、カオス素子系において同種の時空カオスが存在することをシミュレーションによって例証すると同時に、問題の本質を乗法確率過程の定常確率分布の問題へ煮詰めることにより、この時空カオスの本質を鮮やかに浮き彫りにした。また、乱れた界面や発達した乱流の解析にこれまでも用いられてきた多重アフィン・多重フラクタルの解析方法を本現象に適用することにより、現象の多面性を統一的に理解することが可能となった。数値シミュレーションはもっぱら1次元系について行われたが、本理論から明らかかなように、空間の次元は本現象にとって重要ではない。

今後の課題の一つは、現実の系における本特異現象の実証に向けて、理論面から具体的提案を行うことであろう。これとの関連において申請者によるきわめて重要な発見は、内部場と個別素子運動との間の自己無撞着性が本現象にとって本質的ではないという事実である。これにより、非局所結合を持たない素子集団を適当な外力で駆動することによっても同様の現象が得られることが明らかとなった。内在的な時空カオスを生じるような非局所結合系を実験室で実現することはきわめて困難であろうが、このように強制外力のみによって本質的に同一の現象が実現されるならば、それはBelousov-Zhabotinskii反応系等を用いた実験に向けて大きく可能性を開くものとなる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、主論文および参考論文に報告された研究業績を中心として、これに関連した研究分野について諮問した結果、合格と認めた。